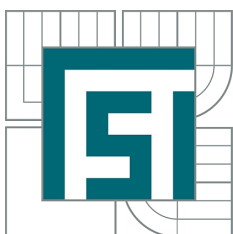


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH EFUZNÍ CELY PRO DEPOZICI ULTRATENKÝCH VRSTEV AL

DESIGN OF AN EFFUSION CELL FOR THE DEPOSITION OF AL ULTRATHIN LAYERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

RADEK ŘIHÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JINDŘICH MACH, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Radek Řihák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Al

v anglickém jazyce:

Design of an effusion cell for the deposition of Al ultrathin layers

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci bakalářské práce bude provedena rešeršní studie na téma depozice ultratenkých vrstev Al a AlN. Dále bude proveden návrh zařízení pro depozici ultratenkých vrstev hliníku v podmínkách ultravysokého vakua (UHV). Bude vyhotovena kompletní výkresová dokumentace. Poté bude efuzní ceta realizována a testována.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Provedení rešeršní studie na téma depozice ultratenkých vrstev Al a AlN.
- 2) Návrh efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Al.
- 3) Realizace efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Al.
- 4) Měření a testování základních vlastností Al atomárních svazků.

Seznam odborné literatury:

- [1] H. Pauly, Atom, Molecule, and Cluster Beams I., Springer Berlin, (2000).
- [2] A. Roth, Vacuum technology, Springer Berlin, North Holland, (1990).
- [3] Valyi, Atom a Ion Source, Akademiai Kiado, Budapest, (1977).

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 23.10.2013

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem efuzní cely pro tvorbu ultrathených vrstev hliníku v podmínkách ultravysokého vakua. Byly navrženy dvě varianty lišící se typem ohřevu. První využívá energie urychlených elektronů, druhý tepelné záření. Zbylé části cel jsou plně zaměnitelné.

Summary

This Bachelor's thesis deals with design and construction of the effusion cell for deposition ultrathin layers of aluminum in ultrahigh vacuum conditions. Two types of effusion were designed. Differences are only in type of heating. The first one exploit energy of accelerated electrons and the second one exploit thermal radiation. Another parts of cells are fully interchangeable.

Klíčová slova

Efuzní cely, hliník, atomární svazek, ultratenké vrstvy, MBE, UHV

Keywords

Effusion cell, aluminum, atom beam, ultrathin layers, MBE, UHV

ŘIHÁK, R. *Návrh efuzní cely pro depozici ultratenkých vrstev Al*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 27 s. Vedoucí Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce.

30.5.2014

Radek Řihák

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce, panu Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D., za cenné rady a pomoc při vypracovávání této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za psychickou a morální podporu.

Radek Řihák

Obsah

Úvod	1
1 Atomární zdroje	3
1.1 Tepelné napařování a homogenita vrstvy	3
1.2 Molekulární svazková epitaxe	3
1.2.1 Epitaxní růst	5
1.3 Efuzní cela	6
2 Teorie atomárních svazků	9
2.1 Rozdělení rychlostí	11
3 Hliník a nitrid hliníku	13
3.1 Hliník	13
3.2 Nitrid hliníku	13
3.2.1 Příprava struktur AlN metodou IBAD	13
3.2.2 Zdroje fotonů a fotodetektory	14
3.2.3 Studená emise elektronů z AlN	14
4 Návrh efuzní cely	17
4.1 Ohřev zásobníku hliníku	17
4.1.1 Ohřev dopadem elektronů	18
4.1.2 Radiační ohřev	18
4.2 Kalíšek	19
4.3 Chlazení	20
4.4 Kolimátor	20
4.5 Příruba	22
Závěr	23
Literatura	24
Přílohy	27

Úvod

Cílem bakalářské práce je navrhnout zdroj atomů pro vytváření ultratenkých vrstev hliníku. Efuzní cely je jedním z typů termálních atomárních zdrojů. Tento typ zdroje atomů se vyznačuje tím, že částice proudí z ústí zdroje tzv efuzním tokem. Tímto zdrojem lze dosáhnout při vhodných podmínkách tzv epitaxního růstu. Jedná se o metodu molekulární svazkové epitaxe (MBE - „*Molecular Beam Epitaxy*“). Ta se vyznačuje tím, že rostoucí vrstvy mají stejnou krystalografickou mřížku jako substrát. Z důvodů, které jsou uvedeny v první kapitole je nutné, aby bylo toto zařízení umístěno v ultravysokém vakuu (UHV).

Efuzní cely se používají v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) pro výrobu tenkých a ultratenkých vrstev z kovů (např. stříbro, zlato nebo gallium nitrid), ale i organických sloučenin. Jedním z důvodů k vytvoření této bakalářské práce je tedy rozšířit množství materiálů, které je v laboratořích možno deponovat. Další motivací je studium vlastností nitridu hliníku (AlN), který lze s pomocí efuzní cely vytvářet a to tzv. depozicí za asistence iontových svazků (IBAD - „*Ion Beam Assisted Deposition*“). Tento materiál se jeví jako velmi perspektivní v mnoha oblastech polovodičového průmyslu.

Hlavní částí bakalářské práce je samotný návrh a konstrukce efuzní cely. Proto byla provedena rešeršní studie termálních atomárních zdrojů. Rovněž jsou v práci shrnuty základní vlastnosti hliníku a nitridu hliníku spolu s jejich využitím. Poslední kapitola je věnována konstrukci, a to pro dva typy cel lišící se druhem ohřevu. Součástí bakalářské práce je i výkresová dokumentace.

1. Atomární zdroje

Zdroje atomů se využívají jak ke studiu srážek částic, tak k pozorování jejich chemických procesů při vysokých energiích. Rovněž se využívají v jaderné fyzice a fyzice plasmatu. V současné době se atomární zdroje uplatňují ve spojitosti s tenkými vrstvami a nanostrukturami.

Tenké vrstvy byly tvořeny už od vzniku prvních vakuových systémů, ale jejich cílená příprava zažila rozmach od 60. let minulého století. Původně byly tenké kovové vrstvy nanášeny na sklo nebo plast, převážně pro optické účely, zrcadla a sluneční brýle. Ve většině případů jsou tyto vrstvy příkladem polykrystalických vrstev. V poslední 30 letech docházelo k velkému rozvoji depozice tenkých vrstev, převážně ve spojitosti s polovodičovým průmyslem.

1.1. Tepelné napařování a homogenita vrstvy

Tepelným napařováním je myšlen ohřev materiálu, jeho následné odpařování a kondenzace na povrchu substrátu. Jedna z podmínek pro vytvoření tenké vrstvy je její konstantní tloušťka. Protože svazek uvolňujícího se materiálu nemá konstantní intenzitu po celém jeho profilu, zpravidla je největší tok částic uprostřed svazku. To má za následek podstatně tenčí vrstvu na okraji vzorku. Je snaha tento nedostatek eliminovat. Toho lze například docílit rotací substrátu. Různá technická řešení rotace během napařování jsou zobrazeny na obrázku 1.1. Nejpoužívanější a současně nejjednodušší je řešení planární (obrázek 1.1 (a)), u něhož jsou vzorky umístěny na sférické ploše, která rotuje kolem své osy. U zdrojů s vysokým tokem částic se používá válcová konstrukce (obrázek 1.1 (b)), u níž je zdroj umístěn na ose válce, na jehož okraji jsou umístěny substráty pro depozici. Pro nejkvalitnější vrstvy je však potřeba využít planetárního řešení (obrázek 1.1 (c)), jde o několik sférických ploch rotujících jak kolem své osy, tak kolem zdroje. Pro laboratorní potřeby, kde jsou rozměry plochy, na níž je potřeba deponovat materiál poměrně malé, je běžné použití konstantní polohy vzorku.

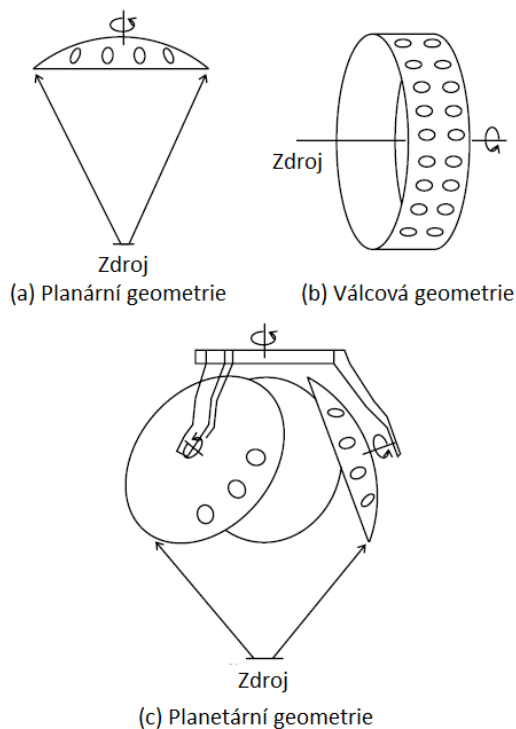
Některé materiály, např. hliník, gallium nebo lithium, mohou být při depozici v kapalném stavu. Z toho důvodu není možné použít napařování z drátu, proto se používá kalíšek. Ten bývá umístěn uvnitř pícky, jejíž vnitřní část je ohřívána na požadovanou teplotu, naopak část vnější bývá chlazena, nejčastěji vodou. Pro planární řešení depozice má kalíšek výhodu možnosti směřování toku částic jedním směrem do požadovaného tvaru. Materiál uvnitř zdroje může být zahříván různými způsoby, např. dopadem urychlených elektronů nebo radiačně. Zahřívání část bývá od zbytku zdroje odstíněna radiačním štítem.

1.2. Molekulární svazková epitaxe

Atomární zdroje často vytváří struktury tzv. molekulární svazkovou epitaxí (MBE - „*molecular beam epitaxy*“). Jde o metodu při níž dochází k epitaxnímu růstu, to znamená, že částice vytváří stejnou krystalickou mřížku, jakou má substrát, na který dopadají. Tímto způsobem může růst velké množství materiálů od oxidů přes polovodiče až po kovy. Tento způsob depozice byl vyvinut v 60. letech minulého století.

Mnoho materiálů může epitaxně růst pomocí vhodné směsi plynů, ty reagují s krystalickým substrátem. Tento způsob se nazývá epitaxe z plynné fáze (VPE - „*vapor phase*“).

1.2. MOLEKULÁRNÍ SVAZKOVÁ EPITAXE

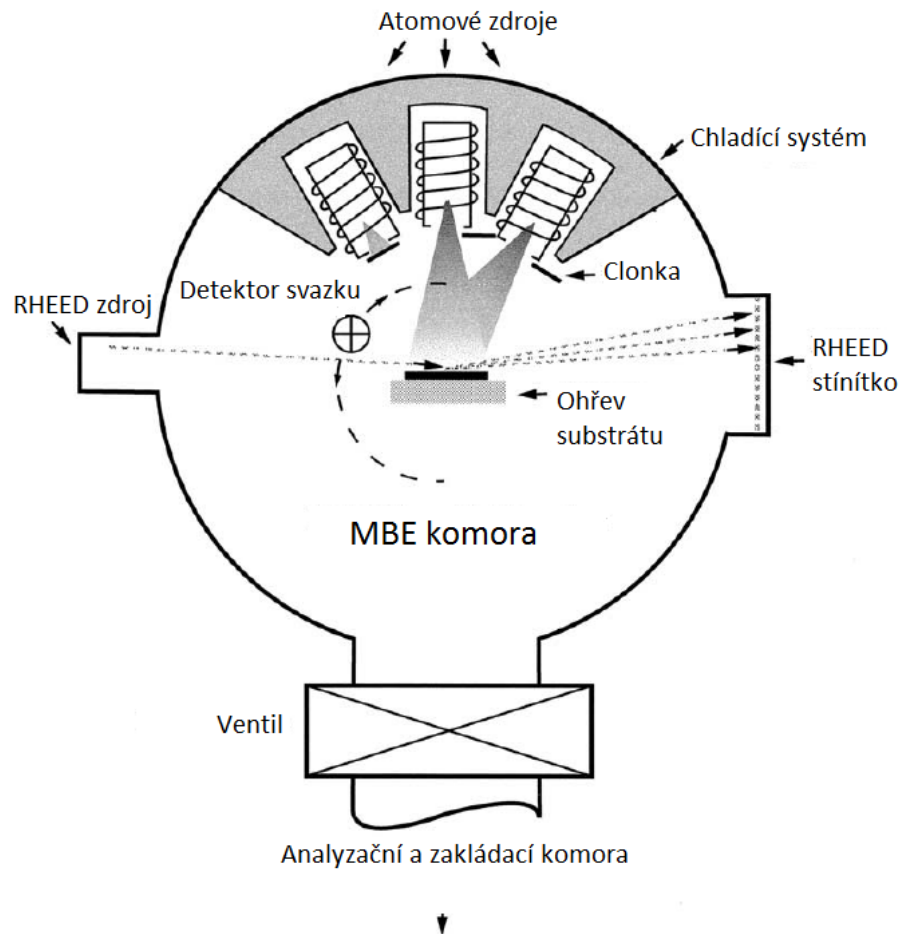


Obrázek 1.1: Rotace substrátu pro tvorbu homogenních vrstev: (a) substrát umístěn na rotující ploše, (b) substráty jsou připevněny na válci rotujícím kolem osy, na níž jsou zdroje, (c) planetární pohyb sférických ploch kolem zdroje. Převzato z [3].

epitaxy). Podobným způsobem lze vytvářet epitaxní vrstvy pomocí kapalin, pak jde o tzv. LPE - „*liquid phase epitaxy*“. Každá z metod má své výhody i nevýhody. VPE je poměrně rychlá, ale kvůli teplotám, na které se musí zahřívat substrát, se zvyšuje pravděpodobnost vzniku objemových difuzí substrátu. Naproti tomu LPE produkuje chemicky čistější vrstvy, ale tloušťka vzniklé vrstvy není zpravidla homogenní.

Pro epitaxní růst je nutno zajistit komoru v ultravysokém vakuu (UHV), a to z několika důvodů. Mezi zdrojem částic a substrátem, na který se deponuje, je poměrně velká vzdálenost. Za atmosferického tlaku by docházelo k velmi častým srážkám svazku atomů opouštějících ústí zdroje s okolními atomy. Z tohoto důvodu je počet atomů nutno redukovat, tedy snížit tlak. Druhým důvodem je udržení do nejvyšší čistoty deponovaného materiálu.

Pro epitaxní růst se využívají ultravakuové komory, schéma typického uspořádání je ukázáno na obrázku 1.2. Vzorek bývá umístěn na topném tělese, které substrát zahřívá na požadovanou teplotu. Na vzorek jsou nasměrovány zdroje částic, mohou mít společné chlazení jako je to na obrázku nebo každý své vlastní. Před zdroji jsou umístěny clonky, které umožňují prakticky ihned zastavit depozici. Částice, které nedopadnou na vzorek, většinou beze srážky s částicemi v komoře dosedají na zdi aparatury, kde kondenzují. Tudíž nedochází ke znehodnocování vakua. Další důležitou součástí je systém pro difrakci vysoko energetických odražených elektronů (RHEED - „*reflection high energy electron diffraction*“). Touto metodou lze kontrolovat epitaxní růst vrstvy po vrstvě. Skládá se ze dvou částí, elektronového zdroje, který urychluje elektrony na energie 10 - 30 keV a fosforescenčního stínítka. Ty následně interagují na vzorku a dopadají na stínítko, kde vytvářejí difrakční obrazec.



Obrázek 1.2: Schéma UHV komory pro depozici ultratenkých vrstev. Převzato z [5].

1.2.1. Epitaxní růst

Jak už bylo dříve zmíněno v kapitole 1.2, k epitaxnímu růstu je zapotřebí UHV prostředí, a to z důvodu zamezení kontaminace vzorku, což by mělo za následek zhoršení jeho vlastností. Pro množství částic n dopadajících na jednotku plochy za čas t platí vztah

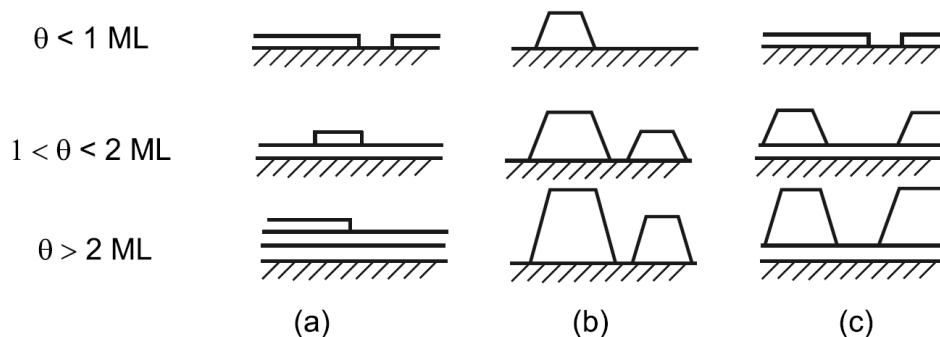
$$\frac{dn}{dt} = \frac{p}{\sqrt{2\pi mkT}}, \quad (1.1)$$

kde p je tlak plynu, m hmotnost dopadající částice, k Boltzmannova konstanta a T teplota. Na cm^2 kubické mřížky připadá asi $3,2 \cdot 10^{14}$ atomů, za sekundu na tento povrch při tlaku $p = 10^{-4}$ Pa dopadne tolik částic, jejichž počet přibližně odpovídá jedné monovrstvě. To ovšem neznamená, že všechny částice, které na povrch dopadnou na něm i zůstanou. Mnoho polovodičů je totiž s plyny, které se vyskytují ve vakuu, relativně nereaktivní.

Růst vrstev se může rozdělit podle růstu vrstev a nukleačních zárodků do tří různých módů, které jsou zobrazeny na obrázku 1.3, kde θ označuje počet atomů k v vytvoření jedné monovrstvy (ML). První z nich je Frankův-van der Merveův, obrázek 1.3 (a), taktéž označovaný jako růst vrstvy po vrstvě. Při tomto módu jsou dopadající atomy více přitahovány k substrátu, než k sobě navzájem. Vlivem toho roste nová monovrstva, až po zaplnění vrstvy předešlé. Tento způsob růstu se projevuje u např. některých vzácných plynů na grafitu a některých kovech a růstu polovodiče na polovodiči. U druhého módu se

1.3. EFUZNÍ CELA

naopak přitahují atomy k sobě navzájem více než k substrátu. To má za následek ostrůvkový růst, tzv. Volmerův-Weberův mód, obrázek 1.3 (b). Atomy nejprve vytvoří nukleační centra, na kterých pak kondenzují další atomy, a tím vytvářejí ostrůvky. Tímto způsobem rostou kovy na izolátorech, včetně mnoha kovů rostoucích na alkalických halogenidech a grafitu. Posledním druhem růstu je vrstev a ostrůvků, tzv. Stranskiho-Krastanovův, obrázek 1.3 (c). Tento jev je kombinací dvou předešlých a nastává v případě, že jsou si přitažlivé síly mezi substrátem a atomy mezi sebou rovny. Nejprve naroste jedna nebo několik monovrstev a následně na ní vznikají ostrůvky. Tento typ růstu lze pozorovat u struktur kov-kov, kov-polovodič a plyn-kov [7].



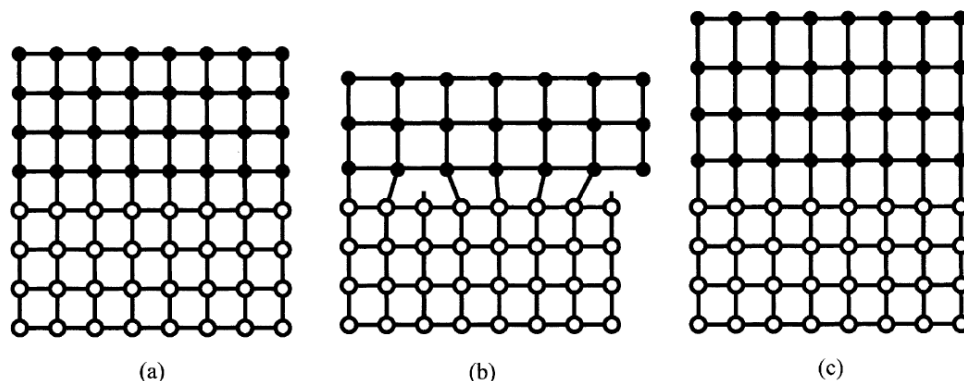
Obrázek 1.3: Znázornění tří růstových módů jako funkce pokrytí Θ monovrstvou (ML): (a) růst vrstvy po vrstvě; (b) růst ostrůvků; (c) růst vrstev a ostrůvků. Převzato z [16].

Vrstvy mohou růst buďto homoepitaxně nebo heteroepitaxně. O homoepitaxním růstu mluvíme v případě, kdy má vrstva stejné chemické složení jako substrát, a tudíž má i stejný mřížkový parametr. Vlivem toho nevzniká ve vrstvě žádné napětí. Heteroepitaxní růst nastává v případě, že vrstva má se substrátem rozdílné chemické složení. Kvůli tomu má vrstva rozdílný mřížkový parametr, a tudíž v ní vzniká napětí. Podle stupně shody mřížkových parametrů je můžeme rozdělit do tří skupin. Na obrázku 1.4 (a) je znázorněna vrstva, která má velmi podobný mřížkový parametr, proto v ní nevzniká prakticky žádné napětí, tento heteroepitaxní typ růstu se nazývá souhlasný. Zbylé dva typy mají parametry značně odlišné, a to o více než jednotky procent. U relaxovaného růstu (obrázek 1.4 (b)) vzniká mnoho dislokací z důvodu velmi rozdílných mřížkových parametrů substrátu a vrstvy. Následný růst vrstvy je nezávislý na struktuře substrátu. Na třetím obrázku je znázorněn napnutý růst s mimoosovou dilatací. Zde dojde ke změně mřížkového parametru a proto ve vrstvě dochází ke vzniku velkého napětí. To v krajním případě může mít vliv na rovinnost vrstvy [5].

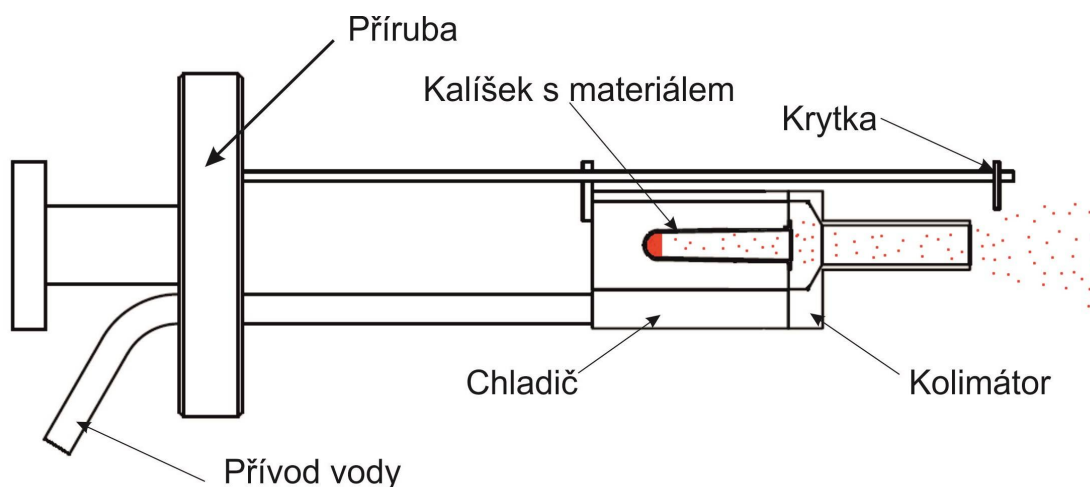
1.3. Efuzní cela

Efuzní cela je jedním z typů atomárních zdrojů. Pracuje na principu teplotního napařování, od ostatních zdrojů se liší tím, že splňuje podmínku efuze (2.1). Základní uspořádání efuzní cely je zobrazeno na obrázku 1.5.

Hlavní částí cely je zdroj materiálu, tím bývá nejčastěji kalíšek. Všechny látky nemusí být umístěny v nádobě, ale mohou být v podobě drátu nebo tyče. Zdroj materiálu musí být vyroben z takové látky, aby vydržel teplotu, na kterou se bude zdroj zahřívat. Rovněž nesmí s materiálem určeným pro depozici chemicky reagovat. Také by měl co nejméně



Obrázek 1.4: Schématické znázornění heteroepitaxního růstu: (a) souhlasný růst, (b) relaxovaný růst, (c) napnutý růst. Převzato z [5]



Obrázek 1.5: Schématické znázornění efuzní cely.

sublimovat, čímž by mohl znehodnotit jak vakuum v komoře, tak vzorek na který se deponuje. Zpravidla jde o wolfram, molybden nebo grafit, často se také používají různé keramické materiály. Ohřev materiálu se provádí například urychlenými elektrony, které jej svým dopadem ohřívají. Rovněž se využívá odporových drátů, které bývají navinuty kolem kalíšku.

Protože v cele obvykle panují vysoké teploty, je nutno ji chladit. Z toho důvodu se ohřívaná část zdroj umísťuje do chladiče, ten bývá vyroben z tepelně vodivých materiálů, nejčastěji se jedná o měď. Z důvodu odvodu tepla se do chladiče přivádí chladicí kapalina, obvykle voda, která přebytečné teplo odvádí pryč. Další podstatnou částí je kolimátor, který má za úkol usměrňovat tok částic. Na jeho konci bývá obvykle umístěna krytka, která má za úkol zastavit proud částic, je-li to potřeba.

1.3. EFUZNÍ CELA

2. Teorie atomárních svazků

Zdroje atomů mívají komoru, v níž dochází k zahřívání materiálu a jeho následnému odpařování. Atomy mohou opouštět komoru efuzním nebo aerodynamickým tokem. U toku efuzního na sebe jednotlivé atomy nepůsobí a ani neiteragují se stěnami štěrby přes kterou procházejí. Aby se takového proudění mohlo dosáhnout, musí se správně zvolit jak tlak plynu, tak tvar a rozměry samotné štěrby. Tento typ proudění se také nazývá molekulární a jeho prostorová a rychlostní distribuční funkce zůstává i při průchodu štěrbinou stejná. Rovněž musí být splněna efuzní podmínka

$$d \ll \lambda, \quad (2.1)$$

kde d je průměr štěrby a λ střední volná dráha částic. Z kinetické teorie plynů platí pro λ vztah

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_k n}, \quad (2.2)$$

kde n je koncentrace atomů a σ_k je účinný průřez definovaný $\sigma_k = \pi\delta^2/4$, kde δ je průměr atomu pro hliník je $\delta = 143 \cdot 10^{-12}$ m. V kinetické teorii plynů platí pro tlak p následující rovnice

$$p = nkT, \quad (2.3)$$

kde k je Boltzmannova konstanta a T absolutní teplota v komoře. Po dosazení (2.3) do (2.2) získáme rovnici

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}p\sigma_k}, \quad (2.4)$$

kde je střední volná dráha závislá na teplotě a tlaku. Za předpokladu, že atomy vycházejí ze štěrby o průměru d jednotlivě a délka této štěrby je zanedbatelná, pak je množství atomů N vystupujících pod prostorovým úhlem $d\omega$ ve směru θ dáno vztahem

$$dN = \frac{d\omega}{4\pi} X n \bar{v} A_S \cos\Theta, \quad (2.5)$$

kde X je parametr, který určuje stupeň disociace, A_S průřez štěrby a \bar{v} střední rychlost částic. Parametr disociace určuje poměr počtu disociovaných atomů ku celkovému množství částic. Pokud se v atomárním zdroji nevyužívá disociace je $X = 1$. Pro předpoklad Maxwellova rozdělení platí pro střední rychlost \bar{v} následující vztah

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (2.6)$$

kde m je hmotnost částic. Po integrování vztahu (2.5) přes prostorový úhel 2π dostáváme

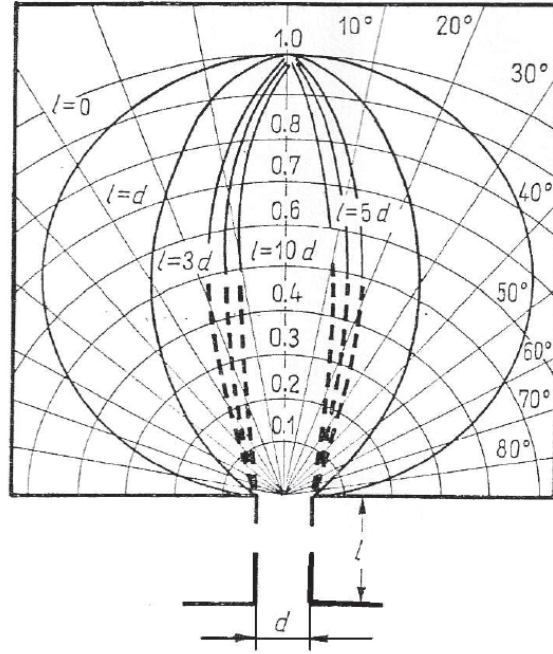
$$N = \frac{1}{4} X n \bar{v} A_S, \quad (2.7)$$

Z výsledného vztahu (2.7) lze vidět, že počet částic lineárně závisí na ploše otvoru, střední rychlosti částic a jejich koncentraci, resp. tlaku. S podmínkou efuze (2.1) souvisí

pouze tlak a velikost štěrby. Z tohoto důvodu lze podmínku (2.1) nahradit vztahem tvarovou podmínku

$$d \leq \lambda. \quad (2.8)$$

Tato podmínka nesouvisí s délkou štěrby. Emise atomů je popsána kosinovým vyzařovacím zákonem. Kosinova distribuční funkce udávající vypařování atomů je zobrazena na obrázku 2.1. Pro nulovou délku otvoru platí křivka označená $l = 0$.



Obrázek 2.1: Kosinová distribuční funkce, kde l je délka trubice a d její průměr. Převzato z [2].

V praxi je potřeba, aby byl svazek částic co nejlépe usměrněn neboli kolimován. Jak je vidět z obrázku (2.1), tak se při prodlužování délky otvoru svazek zužuje. Délka trubice l se však nemůže zvětšovat libovolně, ale musí být splněna podmínka

$$l \leq \lambda. \quad (2.9)$$

Atomy, procházející trubicí(kolimátorem), pod příliš velkým úhlem vzhledem ke ose trubice mají menší pravděpodobnost průchodu kolimátorem. Z toho důvodu je nutno upravit vztah 2.7 do následujícího tvaru

$$N = \frac{1}{4} \xi X n \bar{v} A_S, \quad (2.10)$$

kde ξ se nazývá redukční koeficient. Jde o bezrozměrnou veličinu závislou pouze na geometrii kolimátoru. Pro otvor kruhového průřezu je dán vztahem

$$\xi = \frac{4d}{3l}, \quad (2.11)$$

Důležitou charakteristikou atomárního svazku je rozložení intenzity v závislosti na prostorovém úhlu. Toto rozdělení se popisuje vztahem

$$\theta_{1/2} = \frac{0,84d}{l}, \quad (2.12)$$

kde $\theta_{1/2}$ určuje oblast, kde je intenzita atomárního svazku rovna polovině maximální intenzity.

2.1. Rozdělení rychlostí

Rozdělení rychlostí ve zdrojích atomů bývá obvykle Maxwelllovské. Mějme dN jako počet částic v intervalu $(v, v + dv)$, pak platí následující vztah

$$\frac{dN}{dv_s} = N f(v_s) = N \frac{4}{\sqrt{\pi}} \frac{v_s^2}{\alpha^3} e^{-\frac{v_s^2}{\alpha^2}}, \quad (2.13)$$

kde N je celkový počet částic, m jejich hmotnost a

$$v_s = \alpha = \sqrt{\frac{2kT_0}{m}} \quad (2.14)$$

je nejpravděpodobnější rychlost atomů ve zdroji. Rovnice pro rozložení rychlostí platí pro svazek atomů, pokud je pravděpodobnost, že se atomy dostanou ze zdroje úměrná jejich rychlosti. Pak je rychlost a intenzita svazku popsána vztahem (2.5). Rozložení rychlosti výsledného svazku tedy odpovídá vztahu (2.14) jako násobek rychlosti v . Pokud intenzita atomů s rychlostí v intervalu $(v, v + dv)$ je dána $I(v) dv$, pak

$$\frac{dI(v)_e}{dv} = I_0 \frac{v_s^3}{\alpha^3} e^{-\frac{v_s^2}{\alpha^2}}, \quad (2.15)$$

kde platí, že $\frac{d^2 I(v)_e}{dv^2} = 0$. Pak je nejpravděpodobnější rychlost rovna

$$v_b = \sqrt{\frac{3}{2}} \alpha. \quad (2.16)$$

Z rovnic (2.13) a (2.15) lze vidět, že se rozdělení rychlostí částic ve zdroji liší od částic, které zdroj opustily. Výsledné nejpravděpodobnější rychlosti odpovídají vztahům (2.14) a (2.16)[2].

2.1. ROZDĚLENÍ RYCHLOSTÍ

3. Hliník a nitrid hliníku

Hliník je v přírodě zastoupen asi z 8,3 %, což z něj dělá třetí nejrozšířenější prvek na Zemi. Nejčastěji se vyskytuje v podobě hlinitokřemičitanů. K výrobě čistého hliníku se však používá nejčastěji bauxit. Ten je směsí několika hydratovaných forem oxidu hlinitého, u nichž převažuje „*böhmít*“ ($\gamma - \text{AlO}(\text{OH})$). Hliník spolu s dusíkem tvoří nitrid hlinitý (nitrid hliníku), který lze vyrábět zahřátím hliníku v atmosféře dusíku nebo žháním směsi oxidu hlinitého v atmosféře dusíku.

3.1. Hliník

Hliník je stříbrobílý, lesklý, dobře kujný a tažný kov. Vykazující velmi dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, teplotu tání $T_M = 660^\circ\text{C}$ a hustotu $\rho = 2708 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Stabilní oxidační stav je +III, vzácně se při vysokých teplotách a plynných stavech vyskytuje i +I a +II. V atmosferických podmínkách a ve vodním prostředí je poměrně stálý, protože se na jeho povrchu vytváří pasivační vrstvička Al_2O_3 . V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní vlastnosti hliníku.

Protonové číslo	13
Relativní atomová hmotnost	26,98
Elektronegativita (podle Paulinga)	1,5
Elektronová konfigurace	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Bod tání ($^\circ\text{C}$)	660
Bod varu ($^\circ\text{C}$)	2467
Oxidační stavy	+I, +II, +III
Hustota ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2,7

Tabulka 3.1: Základní vlastnosti hliníku. Převzato z [17]

3.2. Nitrid hliníku

Nitrid hlinitý (AlN) je polovodič se širokým zakázaným pásem $E_g = 6,1 \text{ eV}$. Má teplotu tání $T_M = 2200^\circ\text{C}$, ve vakuu se rozkládá při $T = 1800^\circ\text{C}$. AlN spolu s nitridem hlinito-gallitým (AlGaIn) bohatým na hliník jsou vysoce vhodné pro kompaktní ultrafialové a hluboce ultrafialové světelné zdroje. Ty nachází využití například v oblasti fotolitografie s vysokým rozlišením, v lékařství, při čištění vody nebo vzduchu a podobně. Pro vysokou elektronovou afinitu je tento materiál vhodný pro výrobu katod s autoemisí elektronů užívaných jako zdroje elektronů, viz kapitola 3.2.3.

3.2.1. Příprava struktur AlN metodou IBAD

Depozice za asistence iontových svazků (IBAD - „*ion beam assisted deposition*“ je metoda, která kombinuje napařování s asistencí iontů o nízké energii ($E = 10\text{--}1000 \text{ eV}$). Během růstu tenké a ultratenké vrstvy dopadají na substrát ionty, které mohou mít podstatný vliv na výslednou morfologii a chemické složení výsledné vrstvy. Ionty asistující depozici

3.2. NITRID HLINÍKU

mohou být z inertních plynů (ovlivnění morfologie) nebo z plynů reagující na povrchu s deponovaným materiálem (ovlivnění chemického složení vrstvy). Touto metodou lze vytvářet sloučeniny jako například nitrid gallia nebo nitrid hliníku. Vypínáním a zapínáním iontového svazku lze docílit kombinace několika vrstev. Často se používá více druhů iontů, tím mohou vznikat komplexnější struktury.

Při tvorbě AlN struktur pomocí metody IBAD je důležitý faktor $R(N/Al)$, který udává poměr iontů dusíku a atomů hliníku. Závislost R na energii iontů E je uvedena v tabulce 3.2. Při výrobě jednolitě vrstvy AlN se zvyšujícím se E a R zvyšuje tvrdost, nejvyšší nastává při $E = 500$ eV a $R = 3,6$. Při výrobě struktur, kdy se střídají vrstvy Al a AlN dochází k nejvyšší tvrdosti při $E = 200$ eV a $R = 1,45$. To je způsobeno ionty s vysokou energií pronikajícími hlouběji hliníku, a tím dochází k většímu prolínání vrstev[8].

$E(\text{eV})$	$R(N/Al)$	Počet monovrstev
200	1,45	1
200	2,10	2
300	2,7	3
500	3,6	4

Tabulka 3.2: Parametry přípravy vrstev AlN. Převzato z [8].

3.2.2. Zdroje fotonů a fotodetektory

Zdroje fotonů jako LED („*Light-Emitting Diode*“) součástky založené na bázi AlN mají elektroluminiscenční maximum na $\lambda = 210$ nm, což je nejkratší naměřená vlnová délka u polovodičových diod [9]. Avšak účinnost AlN diod je extrémně nízká, asi 10^{-6} %. Nízká efektivita je způsobena velmi nízkou koncentrací děrových nosičů náboje, vysokou hustotou dislokací a absorbcí SiC substrátem. Koncentrace vodivostních děr je $10^9 - 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ a pouze jejich malá část se vyskytuje v aktivní oblasti. Výkon diody je $p = 0,02 \mu\text{W}$ při $I = 40$ mA.

Často užívané UV detektory používají fotonásobící trubice, ty jsou citlivé také ve viditelné oblasti elektromagnetického záření. Tyto detektory vyžadují jak přívod energie, tak dostatečné chlazení. Z těchto důvodů jsou objemné a tudíž nevhodné pro některé specifické použití. Většina UV detektorů má mezní vlnovou délku přesahující $\lambda = 300$ nm, zatímco detektory založené na AlGaN nebo diamantu mají tuto hranici na $\lambda = 225$ nm. Silné AlGaN vrstvy mají díky iontovým vazbám vysokou odolnost proti tvrdému záření, což je dělá velmi perspektivní kandidáty pro aplikace ve vesmírném prostředí. Fotodetektory založené na bázi AlN mají na rozdíl od křemíkových široký pás zakázaných energií, což jim umožňuje potlačit viditelné pozadí elektromagnetického záření, díky čemuž není třeba využívat optické filtry. AlN detektory mohou pracovat za pokojové teploty, tudíž nepotřebují chlazení.

3.2.3. Studená emise elektronů z AlN

AlN se jeví jako velmi perspektivní materiál pro konstrukci zařízení využívající autoemisi elektronů (emitorů), a to z důvodu velmi nízké elektronové afinity. Emitory ze zmíněného materiálu mají rovněž vysokou mechanickou, termální a chemickou odolnost. Emisní vlast-

3. HLINÍK A NITRID HLINÍKU

nosti AlN lze zvýšit dopováním křemíkem, čímž se zvýší koncentrace volných elektronů. Tím se sníží spouštěcí napětí E_{to} z 15 na $7,8 \text{ V } \mu\text{m}^{-1}$, také se tím zvýší zesilující faktor β z 727 na 957, pro naokrystalickou vrstvou AlN dopovanou 5 % křemíku. Dalším způsobem jak zvýšit účinnost autoemise je použití 1D struktury Jak tyto struktury ovlivňují vlastnosti AlN je uvedeno v tabulce 3.3. To má za následek extrémní zvýšení lokálního elektrického pole a nárůst proudu i s malým přiloženým napětím. Výsledná proudová hustota převyšující $I = 20 \text{ mA cm}^{-2}$ je více než dostačující pro komerční využití těchto struktur při výrobě FE („*Field emission*“) displejů [4].

Vzorek	$E_{to}(\text{V}/\mu\text{m})$	$E_{th}(\text{V}/\mu\text{m})$	β	Fluktuace	Reference
Si:AlN nanojehla	1,8	4,6	3271	< 5 % /5 h	[10]
AlN nanovlákn	2,25		784		[11]
AlN nanojehla	3,1			0,74 %/4 h	[12]
AlN nanohrot	4,7	10,6	1175-1889		[13]
AlN nanohrot 300 (573) K	7,7 (3,9)	7,9 (4,1)	483 (1884)		[14]
Nanokrystalická vrstva Si-AlN	7,8		957		[15]

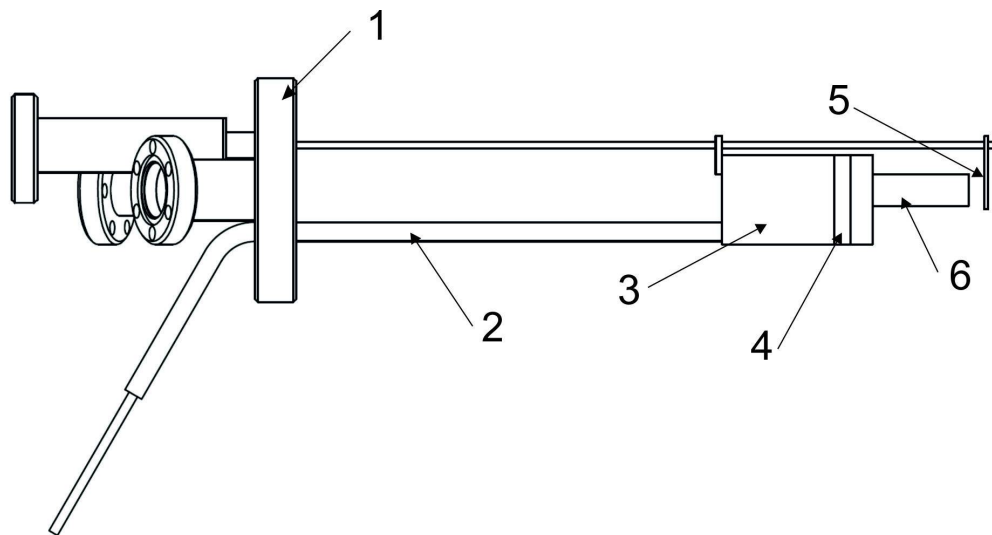
Tabulka 3.3: Vlastnosti AlN struktur pro studenou emisi elektronů.

4. Návrh efuzní cely

V rámci bakalářské práce bylo rozhodnuto provést návrh efuzní cely vhodné pro depozici hliníku. Na návrh efuzní cely byly kladeny nároky jak na rozměry, tak na samotnou depozici materiálu. Požadavky byly následující:

- vhodnost pro depozici hliníku,
- rychlost depozice musí umožňovat epitaxní růst,
- stopa svazku atomů na vzorku o průměru cca 10 mm,
- použití cely v UHV ($p \approx 10^{-6}$ Pa),
- dostatečné chlazení,
- kompatibilita s přírubou DN40,

Pro bakalářskou práci byly realizovány dva návrhy efuzních cel lišící se pouze typem ohřevu. Zbylé části cely jako příruba, kolimátor, chlazení kalíšku a kalíšek samotný jsou pro oba návrhy cel identické. Na obrázku 4.1 je znázorněno schéma finálního návrhu efuzní cely.



Obrázek 4.1: Schéma návrhu efuzní cely; 1) příruba, 2) přívod vody, 3) měděný chladič, 4) chladič výstupního otvoru kalíšku, 5) krytka, 6) kolimátor.

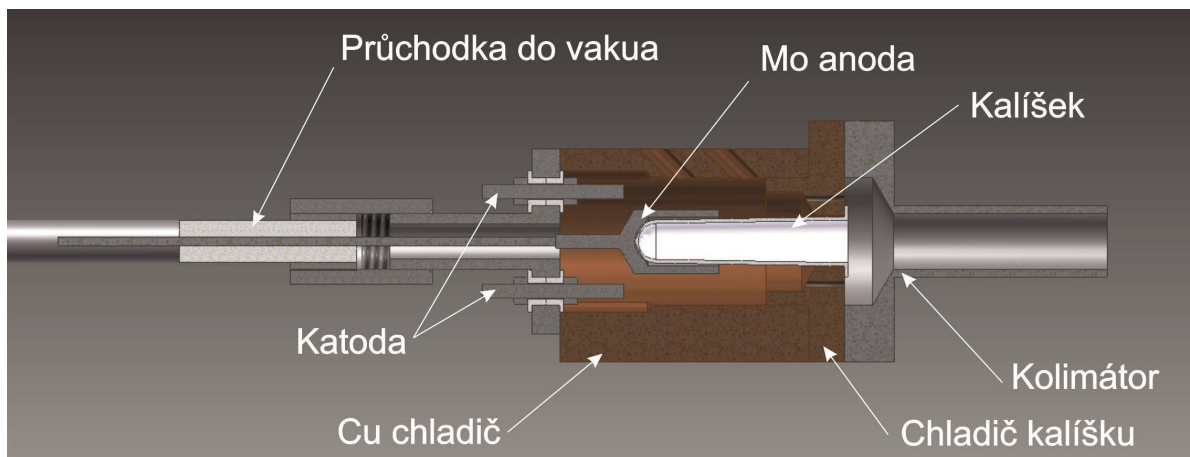
4.1. Ohřev zásobníku hliníku

Ohřev zásobníku hliníku byl realizován pomocí dvou různých principů. První princip byl uskutečněn pomocí urychlených elektronů dopadajících na zásobník. Druhý byl vytvořen na základě ohřevu pomocí tepelného záření.

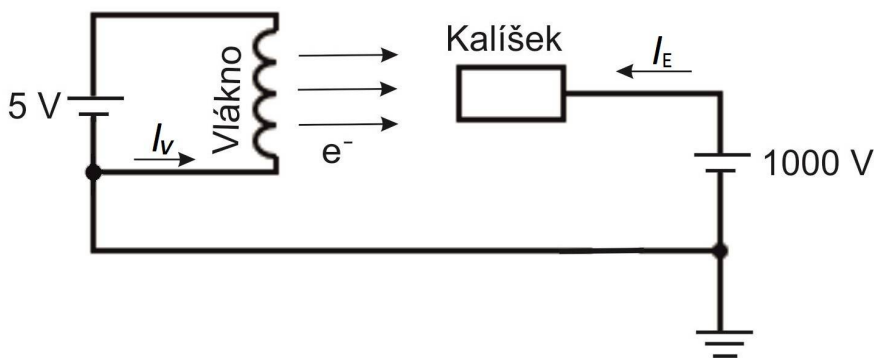
4.1. OHŘEV ZÁSOBNÍKU HLINÍKU

4.1.1. Ohřev dopadem elektronů

Ohřev je prováděn urychlenými termoemisními elektrony, které jsou emitovány z wolfrámového vlákna zahřívaného proudem $I_A \approx 3 \text{ A}$. To je přivařeno mezi dvě závitové tyče izolované od zbytku cely keramickými kroužky, viz obrázek 4.2. Následně jsou elektrony o termální energii 0,1 - 1 eV urychlovány napětím $U_K \approx 1000 \text{ V}$ směrem k molybdenovému kalíšku (obrázek 4.3) a dopadem na kalíšek je svou kinetickou energií zahřívají. Molybdenový materiál kalíšku byl zvolen z důvodu vysoké tepelné odolnosti. Tento kalíšek je připevněn na vakuovou průchodku, na níž je přivařen závit, který zajišťuje axiální pohyb. To umožňuje ohřívání molybdenového kalíšku přitáhnout směrem ke kalíšku z PBN a tím umožnit jeho ohřev. Tato ohřívající část je umístěna ze zadní části měděného chladiče a byla navržena tak, aby se dala snadno odmontovat v případě potřeby výměny vlákna.



Obrázek 4.2: Návrh cely s ohřevem pomocí dopadu urychlených elektronů.



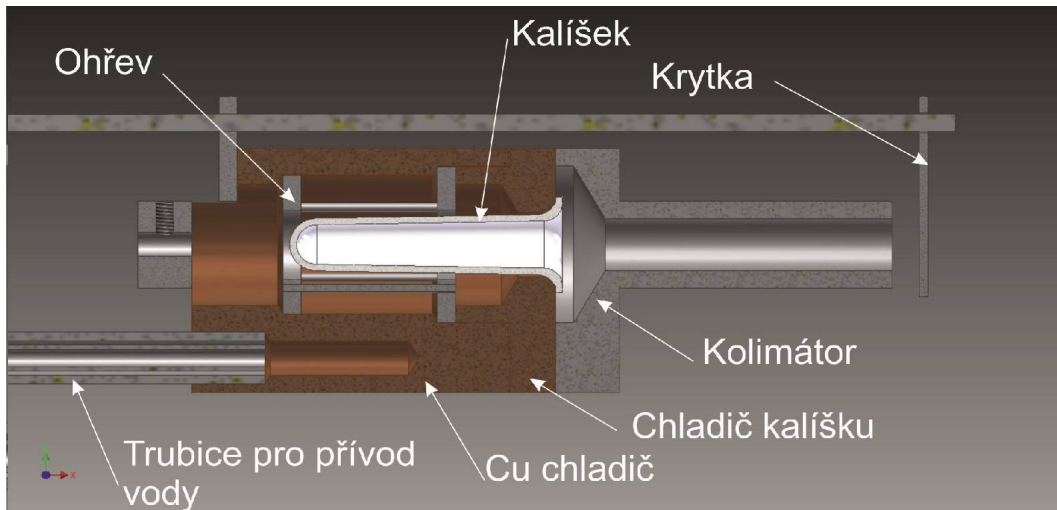
Obrázek 4.3: Schéma zapojení pro ohřev pomocí urychlených elektronů.

4.1.2. Radiační ohřev

Tento druh ohřevu pracující na principu přenosu tepla pomocí tepelného záření je zobrazen na obrázku 4.4. Toto záření je emitováno z tantalového drátu. Průměr drátu byl určen z aproximativního vztahu

$$I = T^2 \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\sigma d^3}{\rho (1 + \alpha \Delta T)}}, \quad (4.1)$$

kde d je průměr drátu, T jeho teplota, ρ měrný odpor, σ Stefanova-Boltzmannova konstanta a α teplotní součinitel elektrického odporu. Tento vztah vychází ze Stefanova-Boltzmannova zákona a předpokládá, že odpor lineárně narůstá s teplotou. Z něj se pak na základě průměrů drátů dodávaných výrobcem vybral průměr $d = 0,125$ mm. Tantal má vysokou teplotu tání 3017°C , nízkou emisivitu a rovněž pohlcuje plyny jako CO_2 , N_2 , atd. [6] a tím snižuje tlak v prostoru zdroje. Drát je navinut mezi dva keramické kroužky z 99% Al_2O_3 , ten je pro tyto účely vhodný z důvodu vysoké tepelné odolnosti a nízké emisivity. Tato keramika je rovněž i při vysokých teplotách elektricky nevodivá. Navržená „klec“ je obalena tantalovou folií, aby tepelně odstínila zbylou část cely. Drát je ohříván proudem přibližně 5 A na teplotu 1000°C .



Obrázek 4.4: Návrh efuzní cely s ohřevem pomocí tepelného záření.

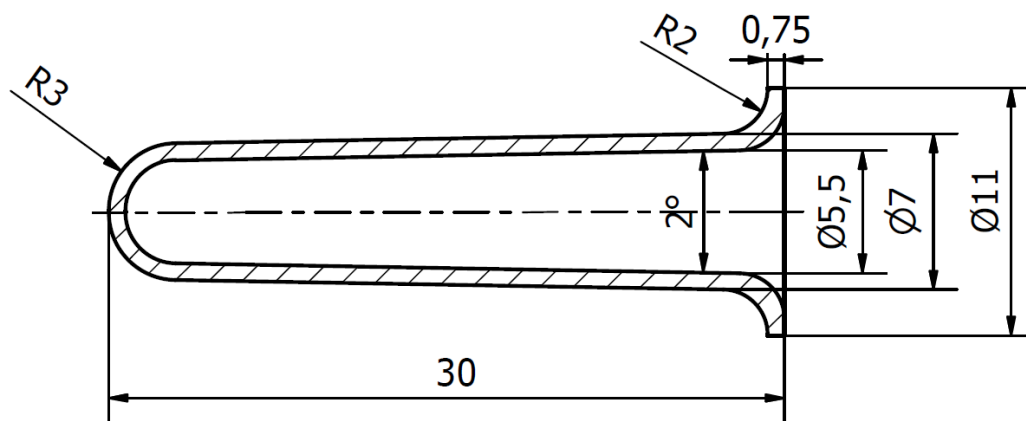
4.2. Kalíšek

Jako materiál kalíšku byla vybrána keramika pyrolytický nitrid boru - PBN, jehož základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4.1. PBN je matný bílý neporézní materiál s vysokým elektrickým odporem a dobrou tepelnou vodivostí. Tato látka je velmi čistá, chemicky inertní a vhodná pro použití do $T = 2500^\circ\text{C}$. Z důvodu vysoké vztlakovosti hliníku je nutno ústí kalíšku chladit. Toto chlazení je realizováno měděným prstencem, který obepíná hrdlo kalíšku.

Maximální pracovní teplota ($^\circ\text{C}$)	2500
Rezistivita ($\Omega\cdot\text{m}$)	$\sim 10^{15}$
Tepelná vodivost ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	2
Hustota ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1,95-2,22

Tabulka 4.1: Základní vlastnosti PBN. Převzato z[18].

4.3. CHLAZENÍ



Obrázek 4.5: Návrh kalíšku z PBN jako zásobník hliníku.

4.3. Chlazení

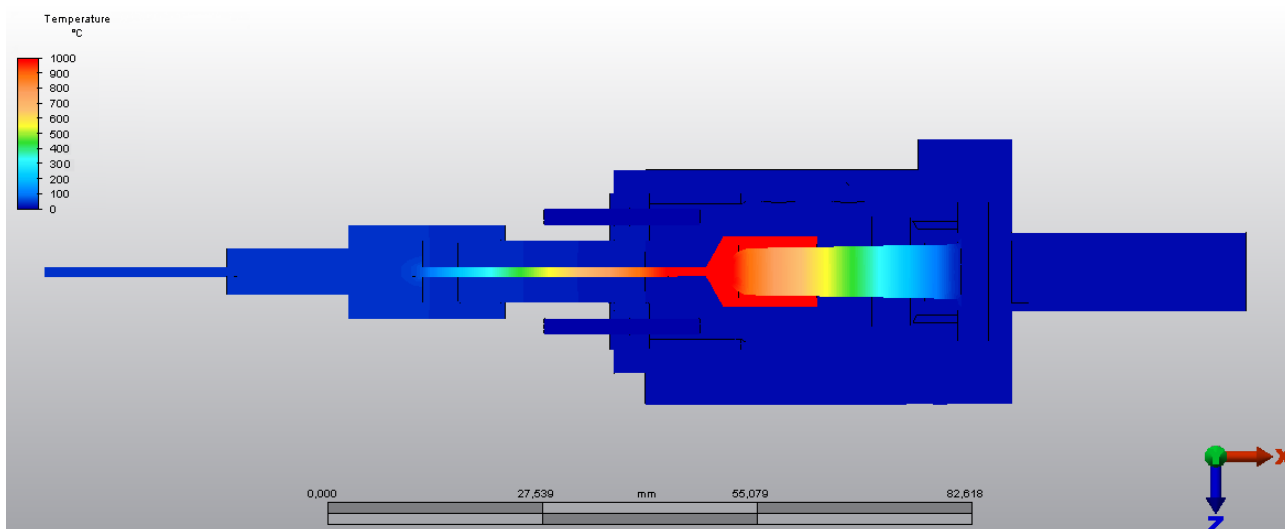
Protože se kalíšek s deponovaným materiálem bude zahřívat na teplotu $T \approx 950^\circ\text{C}$, je nutno chladit jeho okolí z důvodu ochrany dalších částí před poškozením. Jedná se zejména o pájené spoje. Z tohoto důvodu byl celý systém umístěn do měděného válce. Ten byl vyroben z čisté bezkyslíkaté mědi, tzv. „free-oxygen copper“. Ta má vysokou tepelnou vodivost ($386 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) a oproti jiným materiálům (stříbro, zlato) je i poměrně levná. Má teplotu tání $T_M = 1082^\circ\text{C}$ a tudíž se jeví pro konstrukci chladiče jako ideální materiál. Chlazení bylo realizováno pomocí koaxiálního vedení pro vodu, které umožňuje aktivní odvádění tepla z měděného chladiče. Z důvodu ochrany cely před poškozením vysokou teplotou byly na celu umístěny dva termočlánky typu K. První z nich slouží k informaci o aktuální teplotě chladiče. Druhý ukazuje teplotu kalíšku, čímž umožňuje poměrně přesně kontrolovat rychlost depozice.

Z důvodu obavy, že chlazení nebude dostatečné, byla v programu Autodesk Simulation Multiphysics 2012 provedena simulace rozdělení teploty v cele s ohřevem pomocí dopadu urychlených elektronů. Na kalíšku z molybdenu byla zadána teplota 1000°C , voda měla teplotu 15°C . Výpočty byly prováděny pomocí metody konečných prvků. Výsledek simulace je zobrazen na obrázku 4.6. Z něj je patrné, že jediná horká část je pouze kalíšek a jeho nejbližší okolí. Jediné části cely, které jsou od kalíšku z molybdenu zahřívány na vysokou teplotu je dno kalíšku z PBN a část vakuové průchodky. Ústí kalíšku z PBN má teplotu kolem 100°C , což je hluboko pod teplotou tání hliníku. Chladič tudíž dobře odvádí teplo, čímž zamezuje hliníku, aby z kalíšku unikl.

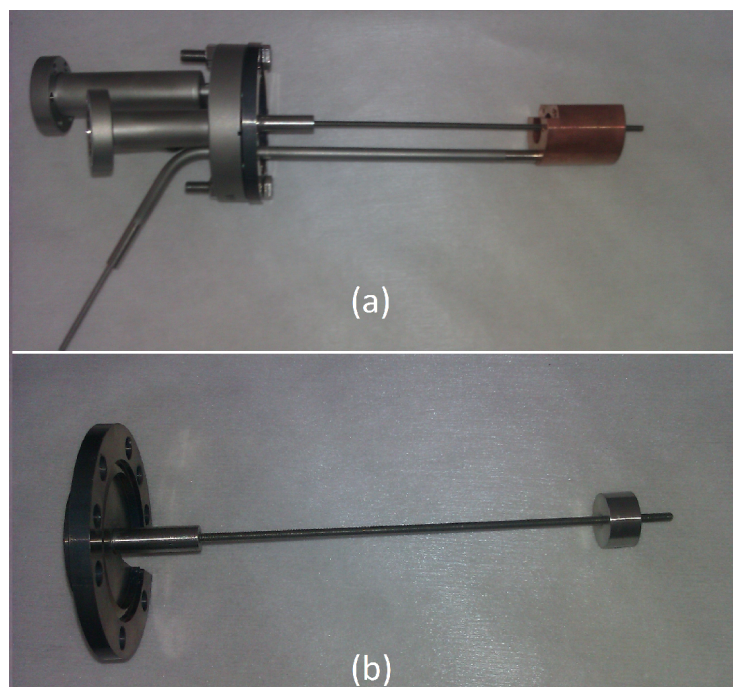
Protože je nutné, aby byl chladicí masiv s přívodem vody spojen vodotěsně, bylo nutné využít vhodný způsob spojení. Z toho důvodu bylo vybráno pájení stříbrem v peci při teplotě $\sim 1000^\circ\text{C}$. Aby byla současně zaručena souosost příruby a těla cely byl použit přípravek zobrazen na obrázku 4.7.

4.4. Kolimátor

Výsledný tvar výstupního svazku atomů lze ovlivnit tvarem kolimační trubice. Parametry, které tyto vlastnosti ovlivňují, jsou popsány v kapitole 2. Rozměry kolimátoru byly zvoleny



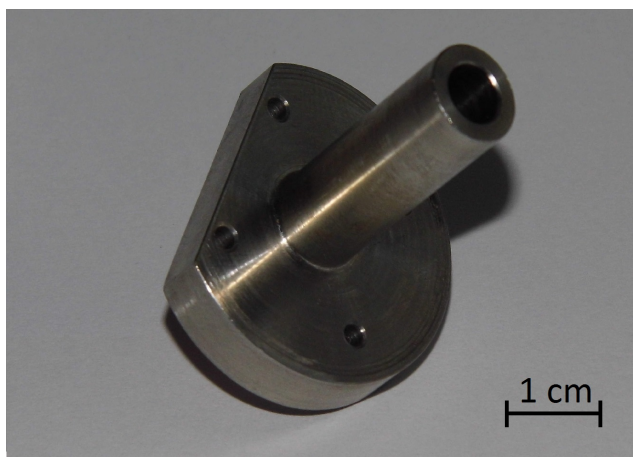
Obrázek 4.6: Simulace rozložení teploty v efuzní cele, kdy je ohřev realizován urychlenými elektrony. Provedeno v programu Autodesk Simulation Multiphysics 2012.



Obrázek 4.7: Provedení přípravku pro zajištění souososti příruby a chladiče. (a) Cela s přípravkem, (b) přípravek.

na základě vztahu (2.12), který na základě poměru l a d (délky a průměru kolimátoru) určuje velikost oblasti, kde je intenzita rovna polovině maximální intenzity výstupního svazku. Vzorek je umístěn 100 mm od ústí kolimační trubice. Podle toho byl zvolen poměr l a d , tzn. délky a průměru. Pro naše účely byla navržena délka 36 mm a průměr 6 mm, tedy $l : d$ je 6 : 1.

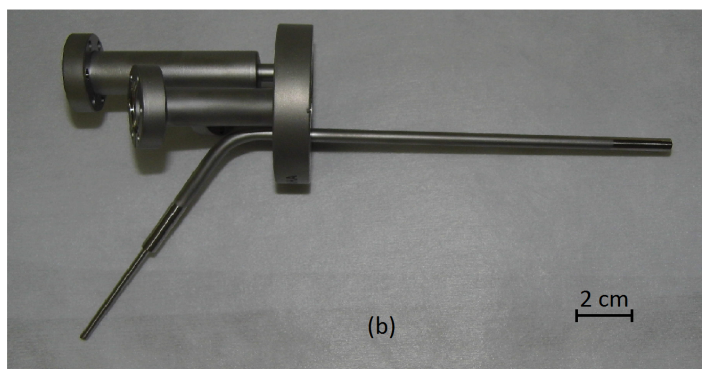
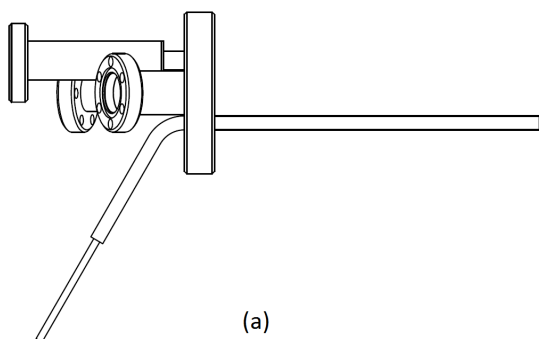
4.5. PŘÍRUBA



Obrázek 4.8: Fotografie kolimátoru.

4.5. Příruba

Jedním z konstrukčních požadavků bylo umístění efuzní cely na normované přírubě DN40. Pod vhodnými úhly na ni byly přivařeny příruby DN16, viz obrázek 4.9, které slouží k umístění elektrických průchodek do vakua a dále průchodky pro přenos rotačního pohybu. Ta má zajišťovat pohyb krytky umístěné před kolimační trubicí, a tím umožnit přesné řízení depozice. Dále je skrz přírubu vedeno koaxiální vedení pro vodu, na němž je připájen měděný chladič.



Obrázek 4.9: Příruba: (a) návrh příruby; (b) Fotografie vyhotoveného přírubového dílu před pájením.

Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat efuzní celu pro depozici ultratenkých vrstev hliníku. Cella bude určena pro výrobu hliníkových nanotruktur v laboratořích ÚFI v Brně.

V první kapitole jsou rozebrány principy růstu tenkých a ultratenkých vrstev pomocí atomárních zdrojů. Tato část se věnuje zejména molekulární svazkové epitaxi - MBE. Jsou v ní uvedeny základní růstové módy (růst vrstvy o vrstvě, ostrůvkový růst a kombinovaný růst). Dále je zde zobrazeno základní uspořádání vakové komory určené pro depozici epitaxních vrstev. V závěru kapitoly je popsán princip činnosti efuzní cely, jakožto atomárního zdroje.

Druhá kapitola teoreticky popisuje základní vlastnosti atomárních svazků. Zejména vliv kolimační trubice na výsledný tvar atomárního svazku, dále i rozdělení rychlostí vně a uvnitř atomárního zdroje.

V další části jsou uvedeny vlastnosti jak samotného hliníku, tak i nitridu hliníku - AlN. Kapitola se dále zabývá využitím AlN pro praktické aplikace. Zejména zdroje fotonů a katody pro studenou emisi elektronů.

Poslední kapitola se zabývá samotným návrhem a konstrukcí efuzní cely. V rámci bakalářské práce byly navrženy a realizovány dvě různé efuzní cely lišící se typem ohřevu. Jednalo se o ohřev pomocí urychlených elektronů dopadajících na molybdenový kalíšek, uvnitř něhož byl zásobník s materiálem určeným pro depozici. Druhý typ ohřevu byl realizován pomocí tepelného záření, které bylo emitováno žhaveným tantalovým vláknem. Ohřívána část, spolu se zásobníkem materiálu, kterým byl kalíšek z PBN, byla následně umístěna do měděného chladiče. Ten je vyroben z bezkyslíkaté mědi, tzv. „*free-oxygen copper*“, jedná se o materiál, který obsahuje 99,95 % mědi. Chlazení zdroje je realizováno pomocí koaxiálního potrubí, kterým proudí voda. Svazek atomů je usměrněn kolimační trubicí umístěnou na výstupu zdroje, jehož délka byla $l = 36$ mm a průměr $d = 6$ mm. Celá tato část byla umístěna na přírubě DN40. Teplota kalíšku a chladiče je kontrolována pomocí termočlánku typu K.

V době odevzdání práce byly vyrobeny všechny části cely, kromě kalíšku (je vyráběn) a rovněž nebyly doručeny vakuové průchodky. Z tohoto důvodu nebylo možné celu celou sestavit.

Cena komerčních efuzních cel podobných parametrů se pohybuje v řádech statisíců korun (kolem 800 000 Kč). Námi navržené cely vyjdou řádově na desetitisíce korun, protože budou sestaveny na ÚFI v Brně.

Po sestavení cel bude zajímavé porovnat obě cely jak z hlediska výkonnostního, tak dle desorbace nečistot, případně vlivu regulace toku.

Literatura

- [1] PAULY, H.: *Atom, molecule, and cluster beams* New York: Springer, c2000. ISBN 35406767322-
- [2] VÁLYI, L.: *Atom and Ion Sources*, Akadémiai Budapest, 1997
- [3] VENABLES, J.A.: *Introduction to Surface and Thin Film Processes*, New York: Cambridge University Press, 2000. ISBN 05-217-8500-6
- [4] BERGMAN, Leah a Jeanne L MCHALE.: *Handbook of luminescent semiconductor materials*. Boca Raton, FL: CRC Press, c2012, xii, 448 p. ISBN 14-398-3467-9
- [5] ARTHUR, J. R.: Molecular beam epitaxy. *Surface Science.* , 2002, vol. 500, 1-3, s. 189-217. DOI: 10.1016/S0039-6028(01)01525-4.
- [6] SHUKLA A. K., BANIK S., DHAKA R. S., BISWAS C., BARMAN S. R., HAAK H.: Versatile UHV compatible Knudsen type effusion cell. *Review of Scientific Instruments.* 2004, vol. 75, issue 11, s. 4467-. DOI: 10.1063/1.1793892.
- [7] VENABLES, J. A., G. D. T. SPILLER a M. HANBUCKEN: Nucleation and growth of thin films. *Reports on Progress in Physics.* 1984-04-01, vol. 47, issue 4, s. 399-459. DOI: 10.1088/0034-4885/47/4/002.
- [8] WANG, X., A. KOLITSCH, F. PROKERT a W. MÖLLER: Ion beam assisted deposition of AlN monolithic films and Al/AlN multilayers: a comparative study. *Surface and Coatings Technology.* 1998, 103-104, s. 334-339. DOI: 10.1016/S0257-8972(98)00410-1.
- [9] TANIYASU, Y., M. KASU a T. MAKIMOTO: CAn aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres. *Nature.* 2006-5-18, vol. 441, issue 7091, s. 325-328. DOI: 10.1038/nature04760.
- [10] TANG, Y. B., H. T. CONG, Z. M. WANG a H.-M. CHENG: Catalyst-seeded synthesis and field emission properties of flowerlike Si-doped AlN nanoneedle array. *Applied Physics Letters.* 2006, vol. 89, issue 25, s. 253112-. DOI: 10.1063/1.2416050.
- [11] BYEUN, Y. K., R. TELLE, S. H. JUNG, S. C. CHOI a H. I. HWANG: The Growth of One-Dimensional Single-Crystalline AlN Nanostructures by HVPE and Their Field Emission Properties. *Chemical Vapor Deposition.* 2010, vol. 16, 1-3, s. 72-79. DOI: 10.1002/cvde.200906801.
- [12] SONG, X., Z. GUO, J. ZHENG, X. LI, Y. PU: AlN nanorod and nanoneedle arrays prepared by chloride assisted chemical vapor deposition for field emission applications. *Nanotechnology.* 2008-03-19, vol. 19, issue 11, s. 115609-. DOI: 10.1088/0957-4484/19/11/115609.
- [13] TANG, Y., H. CONG, Z. CHEN, H. CHENG: An array of Eiffel-tower-shape AlN nanotips and its field emission properties. *Applied Physics Letters.* 2005, vol. 86, issue 23, s. 233104-. DOI: 10.1063/1.1941462.

- [14] LANDREE, O., V. FELLMANN, P. JAFFRENNOU, C. BOUGEROL, H. RENEVIER, A. CROS a B. DAUDIN: Molecular beam epitaxy growth and optical properties of AlN nanowires. *Applied Physics Letters*. 2010, vol. 96, issue 6, s. 061912-. DOI: 10.1063/1.3315943.
- [15] THAPA, R., B. SAHA, N.S. DAS, U.N. MAITI a K.K. CHATTOPADHYAY: Self filling of Ni nanoparticles in amorphous AlN nanotubes and its field emission property. *Applied Surface Science*. 2010, vol. 256, issue 12, s. 3988-3992. DOI: 10.1016/j.apsusc.2010.01.062.
- [16] MACH, J.: *Vývoj a aplikace UHV zařízení pro depozice tenkých vrstev (atomární a iontové svazkové systémy*. [Disertační práce.] Brno: VUT, FSI, 2009. 103 s.
- [17] Aluminium - (Al) - Chemical properties, Health and Environmental effects. *Water Treatment and Purification - Lenntech*.. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/al.htm>
- [18] Momentive Performance Materials Boralloy® PBN Pyrolytic Boron Nitride *Online Materials Information Resource - MatWeb*.. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=6fc5d918886047af94a3ff214002d2ee&ckck=1>

Přílohy

Přílohy na CD

- BP_2014_Řihák_144822.pdf - elektronická verze bakalářské práce
- Kompletní výkresová dokumentace navržených efuzních cel

Přílohy v deskách

- Kompletní výkresová dokumentace navržených efuzních cel